

面向物联网食品货架期监测智能包装研究进展

卢敬锐, 石佳子, 刘晨, 薛可昕, 张新林, 黄霄扬, 张馨月, 付亚波*

(北京印刷学院 印刷包装材料与技术北京市重点实验室, 北京 102600)

摘要: **目的** 对智能传感器技术在智能包装果蔬等食品监测中的应用进行介绍和分类总结, 为果蔬的货架期智能监测提供依据和帮助, 并推动传感器技术在智能包装果蔬领域中的实际应用。**方法** 分别介绍湿敏型、气敏型及微生物检测这几个方面的智能传感器, 以及结合 NFC/RFID 等智能技术在果蔬包装货架期监测中的应用。相较于传统的包装方式, 此类智能包装结合当下发展势态良好的互联网, 给人们的生活带来了更多的便捷。**结论** 智能传感器标签在果蔬等食品智能监测中发挥着重要的作用, 可通过连接智能手机等终端, 快速监测食品新鲜度情况。近年来, 包装材料研发呈现多样化, 例如多元复合纳米材料、金属有机骨架材料等, 因此未来可以通过优化包装传感材料和器件结构, 更好地发挥智能包装标签在果蔬智能包装中的优势。

关键词: 智能包装、传感器技术、货架期监测、智能标签

中图分类号: TB485 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)19-0058-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.008

Research Progress of Intelligent Packaging for Food Shelf Life Monitoring on the Internet

LU Jing-rui, SHI Jia-zi, LIU Chen, XUE Ke-xin, ZHANG Xin-lin, HUANG Xiao-yang,
ZHANG Xin-yue, FU Ya-bo*

(Beijing Key Lab of Printing & Packaging Materials and Technology, Beijing Institute of Graphic Communication,
Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce, classify and summarize the applications of intelligent sensor technology in intelligent packaging fruit and vegetable monitoring, so as to provide the basis and assistance for intelligent monitoring of fruit and vegetable shelf life and promote the practical application of sensor technology in the field of intelligent packaging of fruits and vegetables. The intelligent sensors of moisture-sensitive, gas-sensitive and microbial detection types were introduced, and the application of intelligent technologies such as NFC/RFID in the shelf life monitoring of fruit and vegetable packaging was analyzed. Compared with traditional packaging methods, this kind of intelligent packaging combined with the current development trend of the Internet, brought more convenience to people's life. Intelligent sensor labels play an important role in the intelligent monitoring of food products such as fruits and vegetables, and can quickly monitor the freshness of food by connecting to terminals such as smartphones. In recent years, the research and development of packaging materials have been diversified, such as multi-composite nanomaterials, metal-organic framework materials, etc. Optimizing packaging sensing materials can better utilize the advantages of intelligent packaging labels in intelligent packaging of fruits and vegetables.

KEY WORDS: intelligent packaging; sensor technology; shelf life monitoring; intelligent labels

收稿日期: 2022-11-29

基金项目: 北京印刷学院校级科研项目 (Eb202104, Ec202202); 北京市教委拔尖人才培养计划 (CIT&TCD201904050); 国家级大学生创新创业计划 (202210015001); 北京市大学生创新创业计划 (S202210015023)

食品包装通常用于包装、储运、保存商业化食品。随着智能化时代的到来,食品包装的功能早已不再局限于包装功能,如承载食品加工日期、食品有效期、条形码等信息^[1]。结合物联网的智能包装增添追踪、溯源、监控等新功能^[2],是食品包装行业发展的新趋势。物联网是“物与物相连的互联网”,通过传感器、射频识别技术(RFID)、红外感应、全球定位系统、激光扫描器等智能传感设备或技术^[3],将人、流程与机器连接起来,从而增强行业能力,使包装在整个流程中获得更好的性能^[4]。智能包装连接网络后可以实现快速远程访问设备,建立新的商业模式。由于生鲜食品的货架期较短,需要对其进行货架期监测来保障食品的质量和安全^[5],智能传感器和指示器有助于监测、检测、传感、跟踪和记录包装食品,通过各种通信信号了解食品内部或外部的变化情况^[6-7],因此越来越多的传感器开发集中在食品智能包装监测上。

大多数智能包装是在传统包装中加入指示器或传感器,以检测、追踪包装物,通过检测设备反馈的物理或化学性质,连续输出信号^[8]。传感器与指示器的不同之处主要在于组成,传感器由受体和换能器组成,而指示器在原理上相对简单,通过直接可视的变化情况来传达信息。

物联网技术在智能包装应用方面越来越广泛,RFID技术无须接触就能自动识别,在生产、储运过程中广泛用到该技术^[9-10]。NFC标签常被嵌入包装中,消费者可通过手机检验物品真伪^[11]。智能包装的发展离不开大数据技术,通过数据推算分析,可以得到更加智能的包装形态^[12]。生产者通过商品包装上的二维码(附带商品信息)可以监控商品流通的整个流程。在应用过程中,传感器敏感元件的作用是感受物品的环境条件,转换元件的作用是将电信号转换为计算机语言——数据信号,使用者经分析后可以判断包装内食品是否成熟或腐败等^[13]。将以上几种信息识别技术嵌入智能包装中,不仅有利于信息共享,还可实时监控包装物品的状态,及时对运输或储存条件进行调整,从而更好地监测食品的货架期。

文中从湿度、气体、微生物等方面探讨了近几年物联网包装的最新研究及在食品监测中的应用,拟为该领域的发展提供新方向。

1 果蔬新鲜度监测的相关指标

果蔬的新鲜度由种类、成熟度、储存环境等多个方面决定。水果可以分为旺盛期水果和非旺盛期水果^[14],像香蕉属于旺盛期水果,它们在采摘后也会成熟;草莓属于非旺盛期水果,它们在采摘后不会继

续成熟。旺盛期水果(如香蕉)的新鲜度与成熟度和乙烯的释放有关,而非旺盛期水果(如草莓)的新鲜度主要与时间、温度或腐败程度(如pH值和颜色)有关。果蔬的质量变化由温度、湿度、气体和环境气氛等外部因素所致^[15]。下面对这几个常见的食品质量和安全指标进行讨论。

1.1 湿度

食物周围的湿度水平是保持其品质的重要指标,在某种意义上,把控好包装内环境的湿度就能延缓食品的保质期,湿度成为许多食品传感器的目标。果蔬贮藏时的湿度很重要,理想的相对湿度为85%~95%^[16]。对于大部分果蔬,如果湿度较低,则导致果蔬水分的流失;如果湿度较高,则为微生物和真菌提供了有利的环境,从而加速了果蔬的腐败,还会导致干燥食品变质,食品会变软或受潮,从而缩短食品的保质期。

对于自然生长的食品,水分也是必需的,但在储运过程中水分的损失通常会限制果蔬的生命活力。例如,把辣椒类食品放入纸箱中,当相对湿度低于90%后^[17],水分的流失会导致果蔬表面过于干燥。相反,高湿度环境会加速微生物或细菌的增长,因此监控物品储运过程中水含量或湿度的变化非常有意义。在实际应用中,可以通过加入不同种类的除湿剂或干燥剂^[18],或者使用水分阻隔性高的包装材料^[19]、包装内部结合智能传感器^[20]等方法调控包装内的湿度,从而保证货架期的果蔬处于最合适的湿度环境。

1.2 气体释放

食品在变质过程中会释放气体,产生腐臭的气味。研究者从生物嗅觉系统中获得了灵感,许多食品传感器被设计用于包装和加工,通过监测气体成分来监测食品的质量。在以气体为目标的食物传感器中,常见的标记物包括二氧化碳、氧、乙烯。包装空间内氧气的含量会影响食物的品质,适量的O₂能保持食品的新鲜度。新鲜的果蔬在贮存和运输中会进行呼吸作用,通过调节食品包装中O₂的含量可以明显延长果蔬的保质期。然而,O₂也是食物变质的主要原因,它能促进食物氧化,以及霉菌、需氧细菌、昆虫等的生长。例如,鲜肉类变质是因包装中存在的O₂导致细菌繁殖。O₂含量过低的环境会导致厌氧菌大量繁殖,从而缩短食物的保质期^[21],可见控制包装内O₂的含量对延长食品货架期至关重要。CO₂是食品包装中另一种重要的气体,它不仅能抑制细菌和真菌的生长,还能降低包装环境中的pH,可以通过监控CO₂含量来判断食品的品质^[22]。特殊的包装材料可以吸氧和透出二氧化碳,从而维持果蔬的呼吸作用,达到保鲜效果。由于食品包装顶部空间的CO₂含量被认为是

评估食品质量的指标,因此包装顶空的 CO_2 含量也可作为检验食品是否发生品质改变的一种方式。由此,将相应的 CO_2 传感器或监测装置集成到食品包装中,可以有效监测产品质量。

乙烯 (C_2H_4) 是果蔬成熟过程中重要的代谢产物之一,它既能诱导果蔬成熟,又能导致果蔬过熟,从而缩短果蔬的保质期,因此乙烯是果蔬智能包装货架期监测的重要气体之一。

这里主要讨论了 CO_2 、 O_2 、 C_2H_4 等气体相关指标,这些气体也是智能包装空间中预测食品的质量、成熟度和腐败程度的重要因素。

1.3 微生物

活跃的微生物可能导致食物发生腐败或变质^[23],食源性病菌有大肠杆菌、金黄色葡萄糖球菌、单核增生李斯特菌、沙门氏菌副溶血弧菌、蜡样芽孢杆菌、志贺氏菌、 β -型溶血性链球菌、肉毒杆菌、变形杆菌、空肠弯曲菌、小肠结肠炎耶尔森氏菌等。导致生鲜肉类产生腐败微生物的方法有很多种,且不同产品的特定腐败微生物(SSO)的组分也不同^[24]。鱼类是易腐烂的水产品之一,易受到SSO的影响,使得ATP(腺苷三磷酸)降解为多种产物。可见,微生物的积累变化情况可用于获得有关食品状况的信息,例如确定新鲜度和变质情况。通过测量这些变化的传感器,可以整体评估食品的质量,从根源上检测和控制食品中的微生物,有效减少食品损失^[25]。

1.4 温度

温度是影响食品质量的关键指标之一,它决定了许多食品的变质速率。在食品冷链的装卸过程中,温度常出现波动,这可能会对食品的保质期或质量产生不利影响。此外,温度也是微生物活动的主要决定因素。时间-温度指示器(TTIs)记录了产品的温度历史,可以反映食品暴露在具有破坏性的温度下的时间^[26],通过各种方法(例如扩散、化学反应或酶的变化)来监测依赖温度的性质或过程^[27]。

1.5 pH

微生物的存在会产生酸或碱性代谢产物,可能会改变食品周围环境的pH,可见pH也是监测食物质量是否发生变化的指标之一。食物样品中的pH通常采用比色指示剂来测量^[28],如染料、聚合物等,也可用电化学方法来测量智能包装标签的电信号变化情况^[29],如电阻、电压等。pH传感器的研究还聚焦于将颜色指示剂固定或封装在包装材料中^[30],根据指示剂的显色情况了解包装内部pH的变化。根据文献调研结果,最受欢迎的pH指标是一类天然化合物(如花青素、石蕊^[31]等),具有传感特性的合成聚合物也是具有吸引力的指标(如聚乙二炔^[32]等)。

2 湿敏型物联网智能包装应用

湿度是影响食品保鲜的主要物理参数之一,食品的保质期与所处环境的湿度关系密切^[33]。当环境中的湿度过大时,不仅给微生物提供了生长环境,导致产品质量受损,而且食品包装材料也会受到影响^[34]。由此可见,湿度是许多智能包装传感器的识别目标,果蔬、肉类这些产品需要在非常严格的湿度条件下储存,才能从生产地运输至目的地^[35],体积小、灵敏度高的湿度传感器或RFID标签常被应用于食品包装中^[36]。通过研究传感器在不同湿度条件下监测食物是否变质的性能,从而提高食品的可靠性显得非常重要。

湿度传感器在食品监测运输管理和易腐食品(如水果、蔬菜、肉类和鱼类)的储存方面发挥着重要作用。目前,已有湿度传感器被用于实时包装监测^[37],这些传感器具有简单且容易实现的优点。通常,将湿敏材料通过滴涂、旋涂等方法集成在金属电极上,构成传感器。例如,何昊葳^[38]用一种PET基材、MWCNTs-COOH/ WS_2 为敏感层材料,制作了银叉指电极传感器,可以监测果蔬顶空包装的湿度。结果表明,该传感器的响应较迅速、吸湿滞后性相对较小,可以很好地监测包装内部湿度的变化。侯存霞等^[39]将羧基化多壁碳纳米管(c-MWCNTs)和氧化石墨烯(GO)作为敏感材料,制作了一种湿度传感器,用于冬枣顶空湿度的监测,具有较短的响应/恢复时间(7 s/3.9 s),如图1所示。Hesham等^[40]采用原位聚合法将GO固化在PVC膜中制作传感器,它具有较高的响应速度,GO中的极性氧基和TCP中的氧原子吸附了额外的水分子,从而增强了响应。Wu等^[41]采用MOFs原位聚合法制备了湿感膜传感器,该传感器的响应和恢复时间分别为0.6、1.7 s,具有响应线性、湿度滞后小、稳定性好等优点,可用于食品监测领域,但其重复使用的效果较差。

无线射频识别(RFID)或近场通信(NFC)是实现果蔬监测中无电池无线传感的非常有前景的技术^[42-43],RFID/NFC技术在果蔬监测中应用广泛。Xiao等^[44]设计了一种无电池无线湿度传感器标签,该系统由传感器采集模块和NFC阅读器组成(图2),NFC阅读器可以是支持NFC的智能手机或设备,传感器标签可以获取水果的贮藏温度和重量等数据,通过无线传输到NFC阅读器。NFC阅读器在向传感器标签发送命令的同时,通过集成的货架期预测模型获取传感器数据,并计算水果的货架期。

近年来,与湿度传感器集成的RFID技术受到广泛关注^[45],加装了RFID系统的湿度传感器在跟踪和监测食品包装具有巨大潜力,它能够同时感知和识别^[46]。Tan等^[47]利用固定在纸基板上的平面电感和电容,开

发了一种低成本的无线湿度传感器, 传感器可以很轻松地贴合在包装内壁上。由于食品质量的下降会增加包装中的湿度, 从而改变传感器的谐振频率, 因此可以通过测量传感器谐振频率的变化间接确定包装中食品的湿度和质量, 但其工作频率范围不适于商业使用。Luo 等^[48]制作的柔性 RFID 标签具有成本低的特点, 采用原位金属化和喷墨打印技术获得的有图案的 Ag/PI 薄膜是一种具有无源无线的 RFID 湿度传感器, 它具有良好的湿度灵敏性, 且具有良好的柔性, 它推动了果蔬智能包装的发展。

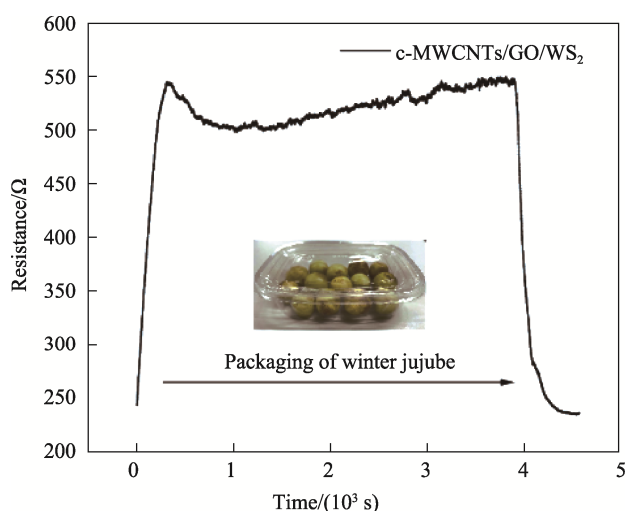


图 1 传感器用于测试冬枣包装顶空湿度变化^[39]
Fig.1 Sensors used to test changes of headspace humidity in jujube packaging^[39]

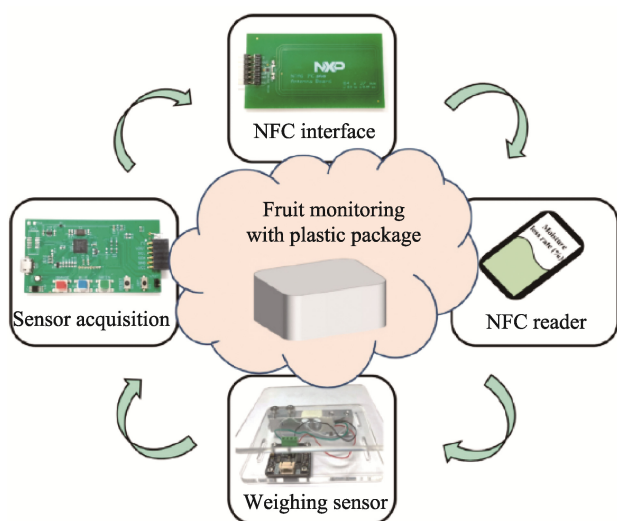


图 2 连接 NFC 的果蔬监测系统^[44]
Fig.2 NFC-connected fruit and vegetable monitoring system^[44]

3 气敏型物联网智能包装应用

在食品流通过程中, 监督和保障食品的质量安全

是首要问题。由于许多气体由腐败或腐烂的食品产生, 因此可通过气味来检测被污染的食物。针对食品包装的大小和类型, 制作微小便捷的气体传感器、选择向消费者输出信号的通信设备是实现智能包装的关键^[49]。

气敏传感器是将气体成分和浓度转换为电信号的传感器。食品在包装中会接触各种气体, 需要进行监测和控制。气敏型智能包装在食品质量安全方面发挥着重要作用, 在包装中果蔬的生理活动和微生物活动会代谢气体和挥发性物质, 如 O_2 、 CO_2 、 H_2S ^[50], 以及挥发性生物胺等^[51], 气体传感器结合智能包装能够测定这些气体产物。即根据 O_2 、 CO_2 含量计算果蔬的呼吸速率^[52], 通过乙烯含量分析果蔬的成熟度, 通过肉类产生的挥发性胺 (氨、二甲胺和三甲胺) 获知该生鲜类食品的腐败程度^[53-54]。由此可见, 采用气敏型传感器能提高包装的功能化^[55], 满足特定食品的包装需求。

目前已制备和研发了许多智能气敏传感器。Mirica 等^[56]研发了一种电化学气体传感检测器, 通过 NFC 标签和碳纳米管取代部分电路, 可与 NH_3 和 H_2O_2 相互作用。Ma 等^[57]开发了一种对氨气敏感的非 NFC 标签, 将甲苯磺酸盐六水合物掺杂聚苯胺 (PTS-PANI) 喷墨印刷在 NFC 标签上, 该标签对体积分数为 0.000 5% 的氨气的响应值为 225%。气体传感器作为 NFC 标签电路中的灵敏开关, 在生物胺浓度超出预设阈值时, 通过连接智能手机就能了解肉类的变质情况。李乐等^[58]制作了一种基于 PEDOT/PSS 和 WS_2 复合材料的柔性氨敏型传感器, 它具有优异的响应时间 (26 s) 和恢复时间 (11 s), 随后作者通过将传感器与 NFC 相连, 在手机端即可监测鱼肉的新鲜程度, 此研究在鱼类智能包装中起着重要作用。

在无源 RFID 标签上设计和制作不同的气敏传感器, 让它们能够在无电源的情况下工作, 与 RFID 阅读器通信, 并发送数据信息。例如, Chung 等^[59]开发了一种无需电池的 RFID 标签传感器, 将此标签与食物包装结合, 可以精确监测鱼类腐败过程中产生的 H_2S 或 NH_3 。Shi 等^[60]采用基于原位聚合法获得的 TiO_2 -PANI 复合材料研制了一种新型低成本微传感器, 其响应值与猪肉中的总挥发性碱性氮 (TVB-N) 具有良好的相关性, 可用于猪肉新鲜度的评价。另外, Bibi 等^[61]基于 UHF-RFID 设计系统开发了一种传感器设备, 由于 CO_2 会影响小麦面筋的介电特性, 因此选择小麦面筋这种天然聚合物来检测食品包装中的 CO_2 。Zhu 等^[62]研究了一种无源无线的近场通信标签氧传感器, 该设备的反射信号对相应浓度氧气的响应较好, 与智能手机兼容, 可对蔬菜包装中的氧含量进行现场非视距质量监测, 能够随时追踪包装内部果蔬

的状态,但其应用过程需根据不同的湿度状况调整涂层的厚度。

手机和移动应用开发有利于消费者确定食物质量和新鲜度水平。Chen 等^[63]将食品条形码用作比色传感器阵列,可以监测食品的状况,摄像头从传感器条形码读取颜色信息,内置应用程序可通过图像处理直接感应条形码颜色的变化^[2],从而生成定量结果,进而监测食品的老化和品质。

在以上研究中,结合 RFID 和传感器的智能标签是智能食品包装的绝佳选择,它们能够监测包装食品的情况或食物周围的环境。在此系统中,标签使用传感器进行监控/感应,采用射频进行无线通信,采用电路进行数据存储^[64]。该标签的前期制作成本较高,因此在一定程度上阻碍了它在食品市场的商业化应用。

4 微生物型物联网智能包装应用

微生物腐败及其代谢和氧化是许多食品变质的主要原因,香蕉、番茄、梨、苹果、芒果和猕猴桃等在生产、运输、储存、销售过程中都可能出现腐败情况^[65-66],可以通过检测易腐食品中的微生物指标来保障食品安全。沙门氏菌^[67]、金黄色葡萄球菌^[67]、单增李斯特菌^[68]、大肠杆菌^[69]等是常见的微生物菌群。将检测微生物的传感器与手持设备或智能手机结合,并应用于智能包装中,可有效监测食品的货架期。生物传感器相较于传统的检测手段,在食品检测领域具有灵敏度更高、检出速度更快等优点,还能实现实时监测及现场检测,具有很强的实用性。

Lin 等^[70]制作了集成外源抗原测试装置,它是一种便捷的基于智能手机的电化学食品分析仪(iEAT)。该装置可用于食品蛋白抗原的检测,集成 iEAT 系统中的恒电位仪可通过蓝牙与智能手机应用程序相连,并将数据上传到云服务器,从而为用户分析食物品质,以及设置检测通道和识别过敏原类型,并显示测量结果。Mishra 等^[71]设计了一种基于有机磷水解酶的生物传感器,在丙烯腈手套表面印制了低成本的一次性电极,食指包含 1 个三电极传感器,拇指用于危险残留物的采样。可将现场检测的伏安结果传输至具有无线蓝牙通信的智能手机上,该系统提供了一种简单的指尖酶法检测方法,用于实时和现场检测毒素,以满足食品安全要求。微生物污染是食品检测中需要突破的领域,虽然生物传感器具有检测速度快等优势^[72],但此类传感器的可重复使用性和准确性仍有待提升。

微生物直接关系到食品变质,食源性病原体是导致疾病的主要原因,因此检测食源性病原体对维护公共卫生非常重要。Xu 等^[73]研究了一种检测 DNA

的平台,可以检测食物或其他样品中的病原体 DNA,该平台利用 3D 打印、微流体和智能手机创建了一个微设备,可进行样品处理、信号放大、温度控制和信号处理等操作,该平台可用于食品安全监测。

5 结语

从湿度、气体释放、微生物、温度和 pH 等方面总结了智能传感器在果蔬包装领域中的应用。在湿度方面,从湿度传感器结合 NFC 或 RFID 等技术展开。在气体释放方面,主要从氨气、乙烯、氧气等传感器与智能技术的结合展开。在微生物方面,主要总结了抗原检测装置和酶传感器等研究内容,目前在温度和 pH 值 2 个方面针对复合型传感器的研究较多。包装传感器有助于在线检测、跟踪、监控食品的质量和安全性,将它与 RFID 或 NFC 等器件集成,可赋予智能包装多种功能,使其更智能化。虽然智能传感器在食品包装领域已经取得了较大进展,它可以监测评估包装内食品的质量,但是其商业化应用仍是一大挑战。文中提及的传感器大多处于实验室或中试阶段,其材料成本较高、制作工艺较繁琐,当前并不适于批量生产,还需付出较大努力才能开发为商业化产品。大多数食品传感器仍需对食品样品进行预处理,这会降低实际应用过程中的可操作性。传感器(尤其是内嵌式)很可能与食品直接接触,因此还需考虑传感材料是否符合食品安全法律法规,避免对食品或人类身体健康产生危害。另外,还需考虑使用寿命完结的传感器是否环保,是否具有回收利用的可能性。

物联网、大数据、AR/VR 和人工智能等新兴技术的发展方兴未艾,包括食品包装在内的传统行业数字化和智能化时代已经来临。随着科技的进步和市场需求的增大,智能传感器、柔性薄膜电子器件等包装传感器(尤其是基于 RFID 或 NFC 载体的集成智能包装)将在万物互联时代中展现出巨大的应用潜力。

参考文献:

- [1] YILDIRIM S, RÖCKER B, PETTERSEN M K, et al. Active Packaging Applications for Food: Active Packaging Applications for Food: Active Packaging Applications for Food[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2018, 17(1): 165-199.
- [2] ULLAH S, HASHMI M, LEE J, et al. Recent Advances in Pre-Harvest, Post-Harvest, Intelligent, Smart, Active, and Multifunctional Food Packaging[J]. *Fibers and Polymers*, 2022, 23(8): 2063-2074.

- [3] 肖婕. 浅谈 RFID 物联网技术应用于电商物流包装的优势[J]. 绿色包装, 2021(3): 43-47.
XIAO Jie. Advantages of RFID Internet of Things Technology in E-Commerce Logistics Packaging[J]. Green Packaging, 2021(3): 43-47.
- [4] 王雄. 包装业中的物联网[J]. 计算机与网络, 2021, 47(10): 35.
WANG Xiong. Internet of Things in Packaging Industry[J]. Computer & Network, 2021, 47(10): 35.
- [5] AHARI H, SOUFIANI S P. Smart and Active Food Packaging: Insights in Novel Food Packaging[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 657233.
- [6] GHORBANI M, DIVSALAR E, MOLAEI R, et al. A Halochromic Indicator Based on Polylactic Acid and Anthocyanins for Visual Freshness Monitoring of Minced Meat, Chicken Fillet, Shrimp, and Fish Roe[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102864.
- [7] EZATI P, RHIM J W. Starch and Agar-Based Color-Indicator Films Integrated with Shikonin for Smart Packaging Application of Shrimp[J]. ACS Food Science & Technology, 2021, 1(10): 1963-1969.
- [8] MAHALIK N P. Processing and Packaging Automation Systems: A Review[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2009, 3(1): 12-25.
- [9] DUROC Y. From Identification to Sensing: RFID is one of the Key Technologies in the IoT Field[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7523.
- [10] BHARGAVA N, SHARANAGAT V S, MOR R S, et al. Active and Intelligent Biodegradable Packaging Films Using Food and Food Waste-Derived Bioactive Compounds: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 385-401.
- [11] 蒋志辉, 王访平. NFC 在智能包装中的应用与分析[J]. 包装工程, 2021, 42(5): 247-254.
JIANG Zhi-hui, WANG Fang-ping. Application and Analysis of NFC in Intelligent Packaging[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(5): 247-254.
- [12] LASSOUED R, MACALL D M, SMYTH S J, et al. Expert Insights on the Impacts of, and Potential for, Agricultural Big Data[J]. Sustainability, 2021, 13(5): 2521.
- [13] BAO Feng, LIANG Zhao, DENG Jing, et al. Toward Intelligent Food Packaging of Biosensor and Film Substrate for Monitoring Foodborne Microorganisms: A Review of Recent Advancements[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022: 1-12.
- [14] VENDRELL M, DOMÍNGUEZ-PUIGJANER E, LLOP-TOUS I. Climacteric Versus non-Climacteric Physiology[J]. Acta Horticulturae, 2001(553): 345-349.
- [15] ALAM A U, RATHI P, BESHAI H, et al. Fruit Quality Monitoring with Smart Packaging[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1509.
- [16] KADER A A, ROLLE R S. The role of post-harvest management in assuring the quality and safety of horticultural produce[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2004.
- [17] DIJKINK B H, TOMASSEN M M, WILLEMSSEN J H A, et al. Humidity Control during Bell Pepper Storage, Using a Hollow Fiber Membrane Contactor System[J]. Postharvest Biology and Technology, 2004, 32(3): 311-320.
- [18] GAIKWAD K K, SINGH S, AJJI A. Moisture Absorbers for Food Packaging Applications[J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, 17(2): 609-628.
- [19] 许超群, 梁旭茹, 岳淑丽, 等. 基于果蔬保鲜的活性包装技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(16): 305-310.
XU Chao-qun, LIANG Xu-ru, YUE Shu-li, et al. Research Progress of Active Packaging Technology on Fruit and Vegetable Preservation[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(16): 305-310.
- [20] DING Su, YIN Tong, ZHANG Shu-cheng, et al. Fast-Speed, Highly Sensitive, Flexible Humidity Sensors Based on a Printable Composite of Carbon Nanotubes and Hydrophilic Polymers[J]. Langmuir, 2023, 39(4): 1474-1481.
- [21] ZHAO Su-fen, LI Xin-fang, LIU Xiao-yan. Study on High-Oxygen Modified Atmosphere Packaging for Chilled Fresh Pork[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200: 474-477.
- [22] LEE S Y, LEE S J, CHOI D S, et al. Current Topics in Active and Intelligent Food Packaging for Preservation of Fresh Foods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(14): 2799-2810.
- [23] 朱军莉, 冯立芳, 王彦波, 等. 基于细菌群体感应的生鲜食品腐败机制[J]. 中国食品学报, 2017, 17(3): 225-234.
ZHU Jun-li, FENG Li-fang, WANG Yan-bo, et al. Spoilage Mechanism of Fresh Food Based on Bacterial Qu-

- orum Sensing[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(3): 225-234.
- [24] 尹德凤, 张莉, 张大文, 等. 生鲜肉类产品中腐败细菌研究[J]. 农产品质量与安全, 2018(3): 21-29.
- YIN De-feng, ZHANG Li, ZHANG Da-wen, et al. Study on Spoilage Bacteria in Fresh Meat Products[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2018(3): 21-29.
- [25] 阮雁春. 食品微生物污染检测方法综述[J]. 食品安全导刊, 2019(30): 158-159.
- RUAN Yan-chun. Review on Detection Methods of Microbial Contamination in Food[J]. China Food Safety Magazine, 2019(30): 158-159.
- [26] WANG Shao-dong, LIU Xing-hai, YANG Mei, et al. Review of Time Temperature Indicators as Quality Monitors in Food Packaging[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 28(10): 839-867.
- [27] BIJI K B, RAVISHANKAR C N, MOHAN C O, et al. Smart Packaging Systems for Food Applications: A Review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(10): 6125-6135.
- [28] KIM D, CAO Yun-teng, MARIAPPAN D, et al. Bacterial Detection: A Microneedle Technology for Sampling and Sensing Bacteria in the Food Supply Chain (Adv Funct Mater 1/2021)[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(1): 2170001.
- [29] WESTON M, KUCHEL R P, CIFTCI M, et al. A Polydiacetylene-Based Colorimetric Sensor as an Active Use-by Date Indicator for Milk[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2020, 572: 31-38.
- [30] POUNDS K, JAIRAM S, BAO Han-xi, et al. Glycerol-Based Dendrimer Nanocomposite Film as a Tunable PH-Sensor for Food Packaging[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(19): 23268-23281.
- [31] SWARUP R, JONGWHAN R. New Insight into Melanin for Food Packaging and Biotechnology Applications[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 62(17): 21-27.
- [32] HALLIL H, HEIDARI H. Smart Sensors for Environmental and Medical Applications[M]. Hoboken: IEEE, 2020: 149-171.
- [33] WESTON M, GENG S, CHANDRAWATI R. Food Sensors: Challenges and Opportunities[J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 6(5): 2001242.
- [34] TULLIANI J M, INSERRA B, ZIEGLER D. Carbon-Based Materials for Humidity Sensing: A Short Review[J]. Micromachines, 2019, 10(4): 232.
- [35] 祝常红, 彭祝亮, 刘海鹏. 温湿度监测系统在食品企业仓储中的应用[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(18): 244.
- ZHU Chang-hong, PENG Zhu-liang, LIU Hai-peng. Application of Temperature and Humidity Monitoring System in Storage of Food Enterprises[J]. Food Research and Development, 2020, 41(18): 244.
- [36] FATHI P, KARMAKAR N C, BHATTACHARYA M, et al. Potential Chipless RFID Sensors for Food Packaging Applications: A Review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(17): 9618-9636.
- [37] CHOI J, CHEN Yi, ABBEL R, et al. Flexible Humidity Sensors for Wireless Monitoring Based on Electrospun Sulfonated Polyether Ether Ketone (SPEEK) Nanofibres[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 324: 128704.
- [38] 何昊威. 用于果蔬包装顶空气氛监测的柔性湿度传感器研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2020: 22-23.
- HE Hao-wei. Study on Flexible Humidity Sensor for Headspace Atmosphere Monitoring of Fruit and Vegetable Packaging[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2020: 22-23.
- [39] 侯存霞, 石佳子, 李乐, 等. 基于 c-MWCNTs/GO 体系的湿敏型智能包装研究[J]. 包装工程, 2022, 43(13): 9-16.
- HOU Cun-xia, SHI Jia-zi, LI Le, et al. Humidity Sensitive Intelligent Packaging Based on c-MWCNTs/GO[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 9-16.
- [40] HESHAM M, MOHAMED M, ATEIA MAHMOUD A, et al. Ultrafast Response Humidity Sensors Based on Polyvinyl Chloride/Graphene Oxide Nanocomposites for Intelligent Food Packaging[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2021, 331: 112918.
- [41] WU Ke, YU Yun-long, HOU Zhao-nan, et al. A Humidity Sensor Based on Ionic Liquid Modified Metal Organic Frameworks for Low Humidity Detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 355: 131136.
- [42] STUART T, CAI Le, BURTON A, et al. Wireless and Battery-Free Platforms for Collection of Biosignals[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2021, 178: 113007.
- [43] XIAO Xin-qing, FU Ze-tian, ZHANG Xiao-shuan, et al. Battery-Free Wireless Sensor System with Compressed Sensing for Table Grapes Cold Chain[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104869.
- [44] XIAO Xin-qing, FU Yi-fan, YANG Yun-yue, et al. Bat-

- tery-Free Wireless Moisture Sensor System for Fruit Monitoring[J]. *Results in Engineering*, 2022, 14: 100420.
- [45] DENG Fang-ming, HE Yi-gang, LI Bing, et al. Design of a Slotted Chipless RFID Humidity Sensor Tag[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 264: 255-262.
- [46] SOLTANI FIROUZ M, MOHI-ALDEN K, OMID M. A Critical Review on Intelligent and Active Packaging in the Food Industry: Research and Development[J]. *Food Research International*, 2021, 141: 110113.
- [47] TAN E L, NG W N, SHAO Ran-yuan, et al. A Wireless, Passive Sensor for Quantifying Packaged Food Quality[J]. *Sensors*, 2007, 7(9): 1747-1756.
- [48] LUO Meng-xue, LIU Zhang-ming, LI Zhi-jiang, et al. Patterned Ag/PI RFID Tag Integrated with Humidity Sensing by in Situ Metallization[J]. *Langmuir*, 2022, 38(37): 11478-11485.
- [49] MATINDOUST S, BAGHAEI-NEJAD M, SHAHROKH ABADI M H, et al. Food Quality and Safety Monitoring Using Gas Sensor Array in Intelligent Packaging[J]. *Sensor Review*, 2016, 36(2): 169-183.
- [50] SOHAIL M, SUN Da-wen, ZHU Zhi-wei. Recent Developments in Intelligent Packaging for Enhancing Food Quality and Safety[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(15): 2650-2662.
- [51] WANG Xiang, FENG Huan-huan, CHEN Tao, et al. Gas Sensor Technologies and Mathematical Modelling for Quality Sensing in Fruit and Vegetable Cold Chains: A Review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110: 483-492.
- [52] 郭鹏飞, 何昊葳, 付亚波, 等. 气敏类智能包装标签技术的研究进展[J]. *包装工程*, 2018, 39(11): 13-18.
- GUO Peng-fei, HE Hao-wei, FU Ya-bo, et al. Research Progress of Gas Sensitive Smart Packaging Labels[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(11): 13-18.
- [53] 黄迎港, 王桂英. 气体传感器在食品智能包装中的应用研究进展[J]. *包装工程*, 2022, 43(15): 137-149.
- HUANG Ying-gang, WANG Gui-ying. Research Progress of Gas Sensors in Smart Food Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(15): 137-149.
- [54] KUSWANDI B. Freshness Sensors for Food Packaging[M]. *Jamber: Elsevier*, 2017: 3-9.
- [55] 许文才, 付亚波, 李东立, 等. 食品活性包装与智能标签的研究及应用进展[J]. *包装工程*, 2015, 36(5): 1-10.
- XU Wen-cai, FU Ya-bo, LI Dong-li, et al. Research and Application Progress of Food Active Packaging and Smart Labels[J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(5): 1-10.
- [56] MIRICA K A, AZZARELLI J M, WEIS J G, et al. Rapid Prototyping of Carbon-Based Chemiresistive Gas Sensors on Paper[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(35): E3265-E3270.
- [57] MA Zhong, CHEN Ping, CHENG Wen, et al. Highly Sensitive, Printable Nanostructured Conductive Polymer Wireless Sensor for Food Spoilage Detection[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(7): 4570-4575.
- [58] 李乐, 石佳子, 侯存霞, 等. 基于 PEDOT/PSS 体系的氨敏型传感器制备及应用研究[J]. *数字印刷*, 2022(5): 85-91.
- LI Le, SHI Jia-zi, HOU Cun-xia, et al. Study on Preparation and Application of Ammonia Sensitive Sensor Based on PEDOT/PSS System[J]. *Printing and Digital Media Technology Study*, 2022(5): 85-91.
- [59] CHUNG W Y, LE G T, TRAN T V, et al. Novel Proximal Fish Freshness Monitoring Using Batteryless Smart Sensor Tag[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 248: 910-916.
- [60] SHI Yong-qiang, LI Zhi-hua, SHI Ji-yong, et al. Titanium Dioxide-Polyaniline/Silk Fibroin Microfiber Sensor for Pork Freshness Evaluation[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 260: 465-474.
- [61] BIBI F, GUILLAUME C, GONTARD N, et al. Wheat Gluten, a Bio-Polymer to Monitor Carbon Dioxide in Food Packaging: Electric and Dielectric Characterization[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 250: 76-84.
- [62] ZHU Rong, DESROCHES M, YOON B, et al. Wireless Oxygen Sensors Enabled by Fe(II)-Polymer Wrapped Carbon Nanotubes[J]. *ACS Sensors*, 2017, 2(7): 1044-1050.
- [63] CHEN Yu, FU Guo-qing, ZILBERMAN Y, et al. Low Cost Smart Phone Diagnostics for Food Using Paper-Based Colorimetric Sensor Arrays[J]. *Food Control*, 2017, 82: 227-232.
- [64] BIBI F, GUILLAUME C, GONTARD N, et al. A Review: RFID Technology Having Sensing Aptitudes for Food Industry and Their Contribution to Tracking and Monitoring of Food Products[J]. *Trends in Food Science*

- & Technology, 2017, 62: 91-103.
- [65] PETRUZZI L, CORBO M R, SINIGAGLIA M, et al. Microbial Spoilage of Foods[M]. Foggia: The Microbiological Quality of Food Elsevier, 2017: 1-21.
- [66] MA Xiao-yuan, JIANG Yi-hui, JIA Fei, et al. An Aptamer-Based Electrochemical Biosensor for the Detection of *Salmonella*[J]. Journal of Microbiological Methods, 2014, 98: 94-98.
- [67] ABBASPOUR A, NOROUZ-SARVESTANI F, NOORI A, et al. Aptamer-Conjugated Silver Nanoparticles for Electrochemical Dual-Aptamer-Based Sandwich Detection of *Staphylococcus Aureus*[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2015, 68: 149-155.
- [68] BAI Xue-kun, WANG Zheng-zheng, LI Wei-qiang, et al. Portable Sensor Based on Magnetic Separation and Enzyme-Mediated Immune Nanomaterials for Point-of-Care Testing of *Listeria Monocytogenes* in Food[J]. Analytica Chimica Acta, 2022, 1236: 340576.
- [69] WU Wei, ZHAO Shi-ming, MAO Yi-ping, et al. A Sensitive Lateral Flow Biosensor for *Escherichia Coli* O157:H7 Detection Based on Aptamer Mediated Strand Displacement Amplification[J]. Analytica Chimica Acta, 2015, 861: 62-68.
- [70] LIN H Y, HUANG Chen-han, PARK J, et al. Integrated Magneto-Chemical Sensor for On-Site Food Allergen Detection[J]. ACS Nano, 2017, 11(10): 10062-10069.
- [71] MISHRA R K, HUBBLE L J, MARTÍN A, et al. Wearable Flexible and Stretchable Glove Biosensor for On-Site Detection of Organophosphorus Chemical Threats[J]. ACS Sensors, 2017, 2(4): 553-561.
- [72] 窦博鑫, 张云亮, 王艳, 等. 生物传感器在食品检测领域的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(3): 845-851.
- DOU Bo-xin, ZHANG Yun-liang, WANG Yan, et al. Advances in the Application of Biosensors in the Field of Food Detection[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(3): 845-851.
- [73] XU Huan, XIA An-yue, WANG Dan-dan, et al. An Ultraportable and Versatile Point-of-Care DNA Testing Platform[J]. Science Advances, 2020, 6(17): eaaz7445.

责任编辑: 彭颀